

# Оптическая бистабильность в кремниевых микро-кольцевых резонаторах при непрерывной накачке

И.А. Рябцев, А.А. Никитин, А.В. Кондрашов, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** представлены результаты экспериментального исследования нелинейных передаточных характеристик микро-кольцевого резонатора, изготовленного по технологии кремний на изоляторе. Экспериментально продемонстрирована оптическая бистабильность, которая возникает в результате конкуренции термооптического эффекта и эффекта генерации свободных носителей заряда, обусловленной двухфотонным поглощением. Представлены экспериментальные результаты, свидетельствующие о доминирующей роли второго эффекта.

**Ключевые слова:** микро-кольцевые резонаторы, бистабильность, двухфотонное поглощение

## 1. Введение

Явление дисперсионной бистабильности в кремниевых микро-кольцевых резонаторах (МКР) находит широкое применение в различных нелинейных компонентах интегральных оптических схем, таких как оптические переключатели [1] и оптические запоминающие устройства [2].

Согласно литературным данным, дисперсионная бистабильность в кремниевых МКР проявляется в результате конкуренции между термооптическим эффектом [3] и нелинейностью, обусловленной возникновением свободных носителей заряда в результате двухфотонного поглощения [4]. В результате термооптического эффекта показатель преломления волноведущей среды увеличивается пропорционально мощности накачки, обеспечивая сдвиг резонанса вниз по частоте. С другой стороны, возникновение свободных носителей в результате двухфотонного поглощения обеспечивает уменьшение показателя преломления, что приводит к противоположному сдвигу [5].

Длительность тепловых процессов обычно не превышает микросекунд, в то время как, время рекомбинации носителей не превышает 200 нс и сильно зависит от различных факторов таких как: технологический процесс изготовления; толщина кремния; уровень легирования и т. д. [7, 8].

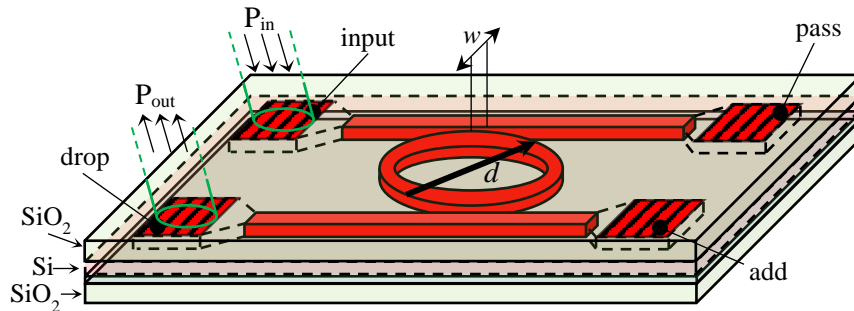
Для наблюдения дисперсионной бистабильности в кремниевых МКР, обусловленной генерацией свободных носителей в результате двухфотонного поглощения, в работе [7] использовался импульсный режим. В этой работе длительность импульсов выбиралась большей времени жизни свободных носителей, но меньшей постоянной времени тепловых процессов.

В настоящей работе приведены результаты исследования бистабильности, обусловленной генерацией свободных носителей в МКР, изготовленном по технологии кремний на изоляторе (КНИ) в режиме непрерывной накачки.

## 2. Описание структуры МКР и результаты исследований

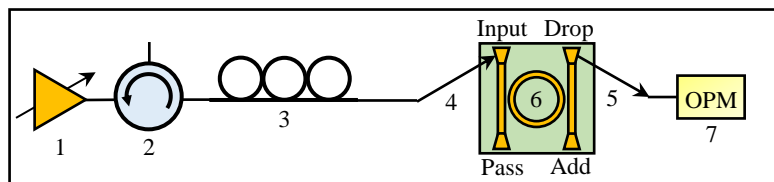
Структура исследуемого резонатора представляла собой кольцо диаметром  $d = 256$  мкм, симметрично связанное с прямыми входным и выходным волноводами, как показано на рисунке 1. Поперечное сечение волноводов, лежащих в основе структуры составляло  $500 \times 220$  нм<sup>2</sup>. Структура изготавливалась по технологии SG25PIC

компании ИНР [9]. Толщины верхнего и нижнего слоев диоксида кремния составляли 14 мкм и 2 мкм соответственно. Расстояние между кольцом и прямыми волноводами составляло  $w = 250$  нм. Оптическое излучение поступало в резонатор при помощи внешнего оптического волокна через брэгговские преобразователи, которые были образованы периодической решеткой шириной 10 мкм, периодом 630 нм, коэффициентом заполнения 0,5 и глубиной травления 70 нм. Брэгговские преобразователи соединялись с прямым волноводом шириной 500 нм с помощью конусообразных переходов длиной 128 мкм, которые обеспечивали согласование диаметров волновых мод. Потери на ввод и вывод излучения, измеренные при помощи оптических волокон для квази-ТЕ-моды составили 11.6 дБ.



**Рисунок 1.** Структура исследуемого МКР

Макет экспериментальной установки, представленный на рисунке 2, включает следующие элементы: (1) лазер с плавной перестройкой частоты вверх и вниз; (2) оптический циркулятор, препятствующий обратному распространению сигнала; (3) контроллер поляризации, необходимый для настройки поляризации, которая обеспечивала максимальный коэффициент передачи; сколотые волокна для ввода (4) и вывода (5) сигнала; (6) исследуемый МКР; (7) измеритель оптической мощности.



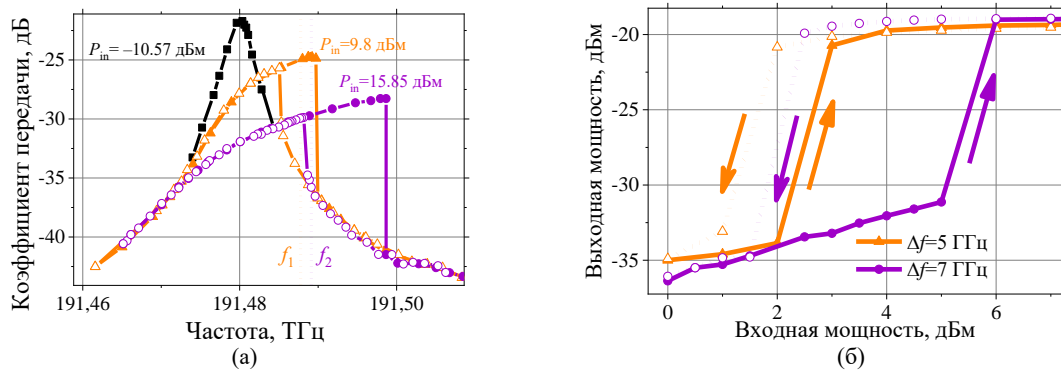
**Рисунок 2.** Схематическое изображение экспериментальной установки

Для исследования резонансных свойств МКР рабочая частота лазера устанавливалась в диапазоне 191 – 196.2 ТГц. Далее лазер переводился в режим плавной автоматической перестройки рабочей частоты. Сигнал, проходящий через МКР, регистрировался оптическим измерителем мощности, синхронизированным с лазером.

На рис. 6 (а) сплошными черными квадратами показана линейная передаточная характеристика, измеренная вблизи резонансной частоты  $f_0 = 191.48$  ТГц при входной мощности  $P_{in} = -10.57$  дБм. Нелинейные передаточные характеристики измерялись при увеличении уровня входной мощности. При мощности  $P_{in} = 9.8$  дБм наблюдалось затягивание частоты в область высоких частот и увеличение потерь, обусловленное нелинейным затуханием (см. белые пустые и сплошные оранжевые треугольники на рис. 6 (а)). Здесь и далее на рис. 6 (а) пустыми символами показаны результаты измерений, полученные при изменении рабочей частоты лазера вниз, а

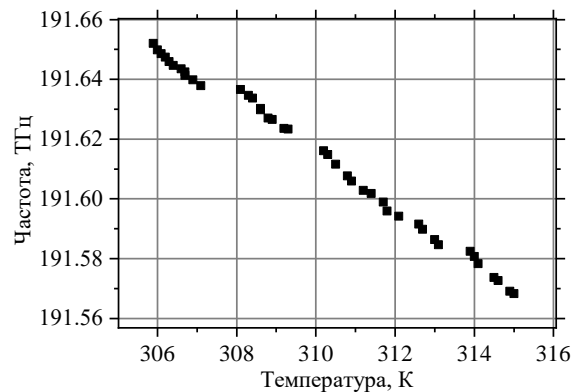
сплошными – вверх. Как видно, дальнейший рост мощности до  $P_{in} = 15.85$  дБм обеспечивает расширение области гистерезиса, соответствующей частотному диапазону бистабильного поведения передаточной характеристики, а также рост нелинейного затухания (см. пустые и сплошные фиолетовые круги на рис. 6 (а)).

Другим способом описания бистабильного поведения МКР является измерение зависимости выходной мощности от входной мощности при различных отстройках от резонансной частоты. На рисунке 6 (б) оранжевыми и фиолетовыми линиями показаны зависимости, измеренные для частот отстройки 5 ГГц и 7 ГГц соответственно. Эти характеристики были получены при увеличении (см. сплошные линии на рис. 6 (б)) и уменьшении (см. пунктирные линии на рис. 6 (б)) мощности входного сигнала. Положения этих частот показаны на рис. 6 (а) оранжевыми и фиолетовыми пунктирными линиями соответственно. Как видно из рисунка 6 (б) увеличение частоты отстройки обеспечивает расширение наблюдаемого гистерезиса.



**Рисунок 6.** Передаточные характеристики МКР при разных уровнях входной мощности (а); зависимости выходной мощности от входной мощности при разных значениях отстройки (б)

Для определения природы нелинейного поведения резонатора было проведено дополнительное исследование зависимости резонансной частоты от температуры. Исследуемый резонатор помещался в термокамеру, которая обеспечивала нагрев до 315 К. Далее температура плавно уменьшалась со скоростью 1 К/мин. Изменение температуры фиксировалось тепловизором. Измерение коэффициента передачи кольцевого резонатора проходило в линейном режиме. Полученная зависимость положения резонансных частот от температуры показана на рисунке 7 черными квадратами. Из рисунка 7 видно, что увеличение температуры МКР приводит к смещению резонансной частоты в область низких частот. Такое поведение обусловлено, уменьшением показателя преломления, вызванное термооптическим эффектом.



**Рисунок 7.** Зависимость резонансной частоты МКР от температуры

Из рисунка 6 (а) видно, что с увеличением мощности резонансная частота сдвигается вверх, а величина коэффициента передачи уменьшается в результате нелинейного затухания. Этот процесс сопровождается выделением тепла. Однако в эксперименте наблюдался сдвиг резонанса в область высоких частот, что свидетельствует о доминирующей роли нелинейности, обусловленной генерацией свободных носителей [7, 10].

### 3. Заключение

В работе приведены результаты экспериментального исследования нелинейных передаточных характеристик МКР, изготовленных по технологии КНИ. Показано, что увеличение мощности оптического излучения до 15.85 дБм обеспечивает появление гистерезиса на передаточной характеристике шириной 10.5 ГГц. Также в работе приведены гистерезисы выходной мощности при частотах отстройки 5 и 7 ГГц. Доминирующая роль нелинейного поведения, обусловленного генерацией свободных носителей заряда в результате двухфотонного поглощения подтверждена путем измерения влияния температуры на положение резонансной частоты.

Работа частично поддержана **Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Госзадание", грант № FSEE-2020-0005)**.

#### Список литературы

1. Notomi M. et al. Optical bistable switching action of Si high-Q photonic-crystal nanocavities //Optics Express. – 2005. – Т. 13. – №. 7. – С. 2678-2687.
2. Liu L. et al. An ultra-small, low-power, all-optical flip-flop memory on a silicon chip //Nature Photonics. – 2010. – Т. 4. – №. 3. – С. 182.
3. Almeida V. R., Lipson M. Optical bistability on a silicon chip //Optics letters. – 2004. – Т. 29. – №. 20. – С. 2387-2389.
4. Dekker R. et al. Ultrafast nonlinear all-optical processes in silicon-on-insulator waveguides //Journal of physics D: applied physics. – 2007. – Т. 40. – №. 14. – С. R249.
5. Gibbs H. M. et al. Optical bistability in semiconductors //Applied Physics Letters. – 1979. – Т. 35. – №. 6. – С. 451-453.
6. Eichler H. J. et al. Optical nonlinearity and bistability in silicon //physica status solidi (b). – 1988. – Т. 150. – №. 2. – С. 705-718.
7. Xu Q., Lipson M. Carrier-induced optical bistability in silicon ring resonators //Optics letters. – 2006. – Т. 31. – №. 3. – С. 341-343.
8. Claps R. et al. Influence of nonlinear absorption on Raman amplification in Silicon waveguides //Optics Express. – 2004. – Т. 12. – №. 12. – С. 2774-2780.
9. ИИР – innovations for high performance microelectronics, 2020, <https://www.ihp-microelectronics.com/en/services/mpw-prototyping/sigec-bicmos-technologies.html> (Последнее обращение 28 Апреля 2021)
10. Nikitin A. A. et al. Carrier-induced optical bistability in the silicon micro-ring resonators under continuous wave pumping //Optics Communications. – 2021. – Т. 480. – С. 126456.